

DOI: 10.11779/CJGE2021S2027

# 考虑抗剪强度空间变异性的双层黏土边坡风险分析

易 顺<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 岳克栋<sup>5</sup>, 陈 健<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 黄珏皓<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 李健斌<sup>6</sup>, 邱岳峰<sup>7</sup>, 田 宁<sup>1, 2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 湖北省环境岩土工程重点实验室, 湖北 武汉 430071; 4. 岩土力学与工程国家重点实验室宁波工程学院工程软土实验中心,

浙江 宁波 315211; 5. 长江勘测规划设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 6. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006;

7. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

**摘 要:** 土性参数空间变异性具有各向异性的特点, 因而采用各向异性随机场来描述边坡参数空间分布的特征更为合理。针对某一双层黏土边坡, 基于土体抗剪强度的各向异性随机场, 研究了土体参数的竖向波动距离、水平向波动距离和变异系数对边坡失稳概率、失稳模式和风险评估的影响。主要得到的结论如下: 随着 COV 的增大, 边坡失稳风险逐步增大, 在低变异性土体中, 几乎没有边坡失稳风险。整体而言, 边坡失稳概率和边坡失稳风险随变异系数的变化规律保持一致性。深层滑动模式占比很大, 但随着 COV 的增大, 深层滑动模式逐步向浅层滑动模式过渡; 当波动距离(包括水平向和竖向)增大时, 边坡失稳概率和失稳风险均相应增大, 但当波动距离超过一定大小(表现与边坡尺寸相关)时, 失稳概率和失稳风险受到波动距离增大的影响幅度变小。

**关键词:** 各向异性; 随机场; 双层黏土边坡; 失稳概率; 失稳风险

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S2-0112-05

**作者简介:** 易 顺(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事随机场理论及边坡稳定性方面的研究。E-mail: sunyee\_123@163.com。

## Risk analysis of two-layer clay slopes considering spatial variability of shear strength

YI Shun<sup>1, 2, 3, 4</sup>, YUE Ke-dong<sup>5</sup>, CHEN Jian<sup>1, 2, 3, 4</sup>, HUANG Jue-hao<sup>1, 2, 3, 4</sup>, LI Jian-bin<sup>6</sup>, QIU Yue-feng<sup>7</sup>, TIAN Ning<sup>1, 2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of

Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hubei Key Laboratory of

Geo-Environmental Engineering, Wuhan 430071, China; 4. The Soft Soil Research Center in Ningbo University of Technology, State Key

Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Ningbo 315211, China; 5. Changjiang Institute of Survey, Planning Design

and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 6. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

7. Power China Zhongnan Engineering Corporation limited, Changsha 410014, China)

**Abstract:** Anisotropy exists in the spatial variability of soil parameters. Therefore, it is rational to indicate the spatial distribution of slope parameters using anisotropy random fields. Based on the anisotropic random field of shear strength of soil for a two-layer slope, the effects of vertical scales of fluctuation, horizontal scales of fluctuation and coefficient of variation (COV) of soil parameters on the slope failure probability, instability modes and risk assessments are studied. The main conclusions are drawn as follows: with the increase of COV, the risk of slope failure gradually increases. In low-variability soils, there is almost no risks of slope failure. On the whole, the failure probability of slope is consistent with the risk of failure as COV increases. The deep-layer slope mode accounts for a large proportion, but with the increase of COV, the deep-layer slope mode gradually becomes the shallow slope one. When the scale of fluctuation (including horizontal and vertical) increases, the failure probability of slope and risks increase accordingly. However, when the scale of fluctuation exceed a particular size, which is related to the size of the slope, the increasing amplitude of failure probability and risks slows down as the scale of fluctuation increases.

**Key words:** anisotropy; random field; two-layer clay slope; probability of failure; risk of failure

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(52079135); 国家自然科学基金青年基金项目(51909259, 52008122); 宁波市公益类科技计划项目(2019C50012); 湖北省建设科技计划项目(2018); 中国科学院国际合作局国际伙伴计划(131551KYSB20180042)

**收稿日期:** 2021-08-13

**\*通信作者** (E-mail: jchen@whrsm.ac.cn)

## 0 引言

边坡是一种常见的岩土结构物,在进行边坡可靠度设计以及风险评估时,往往需要考虑岩土工程中不确定性的特点,这种不确定性主要来源于参数的不确定性、模型的不确定性和人为的不确定性<sup>[1]</sup>。其中参数不确定性是岩土体本身固有的特性,岩土体受到应力环境、内部物质组成和埋藏条件等的影响,土体参数往往呈现出明显的空间变异性特征<sup>[2-3]</sup>,因而在边坡稳定性分析中采用忽略参数空间变异性的确定性方法已经不再适用,利用概率分析方法来解决这个问题不失为一条很好的途径<sup>[4]</sup>;针对边坡失效概率分析,程红战等<sup>[5]</sup>开展了考虑土体参数旋转各向异性相关结构的边坡稳定性分析,Griffiths等<sup>[6]</sup>研究了土体参数的波动距离和变异系数对边坡失稳概率的影响。相较于边坡稳定性分析,对边坡风险评估的研究较少。近些年来,Huang等<sup>[7]</sup>在边坡风险评估的研究中提出了在多种失效模式框架下的风险定量评估方法。Cheng等<sup>[8]</sup>研究了不同的参数自相关结构对边坡风险评估的影响。然而这些研究均没有考虑到土体参数在不同方向上的变异特征对边坡风险的影响,实际上土体参数空间变异性受土层物质组成、沉积年代、成因条件等因素而有所差异,但由于土层在竖直方向上是“逐渐”形成的,在水平方向上是大面积“同时”形成的,因此对于一般土性参数而言,其在竖直方向上较为“离散”,且水平方向上较为“均匀”,即水平向自相关距离一般远大于竖直自相关距离,且水平向不同方向的自相关距离基本一致,因此天然土层土性参数的自相关性具有“横观各向同性”的特点。因此,考虑土体参数“横观各向同性”的边坡风险分析会更加贴合实际情况。

本文针对某一双层黏土边坡,考虑土体抗剪强度参数“横观各向同性”的空间变异性,研究了土体参数的竖向波动距离、水平向波动距离和变异系数对边坡失稳概率、失稳模式和失效风险的影响。该研究可以为类似的边坡工程防治提供有益的参考。

## 1 各向异性随机场条件下的边坡随机分析流程

土性参数的空间变异性是在土体自然沉积过程或后沉积过程中形成的,由此造成了土性参数具有各向异性的特点。文献[3]的研究也表明,土性参数的水平相关距离要比竖向相关距离大得多。Phoon 等<sup>[3]</sup>和 EL-RAMLY 等<sup>[9]</sup>的研究也表明,土性参数的水平波动距离  $\theta_x$  一般为 10~80 m,而竖向波动距离  $\theta_z$  一般为 1~3 m。其中,各向异性系数  $\xi=\theta_x/\theta_z$ 。

目前基于各向同性随机场的边坡风险评估研究常有报道,但这类随机场忽略了土性参数的波动距离在水平方向上和竖向上的差异。为了进一步研究土性参数各向异性特征对边坡风险评估的影响,有必要建立土性参数各向异性随机场。本文采用对数正态分布随机场来描述土性参数的变异性特征,同时利用指数型相关函数来表示土体中任意点处参数之间的相关性:

$$\rho(\tau_x, \tau_z) = \exp \left[ -2 \times \left( \frac{|\tau_x|}{\theta_x} + \frac{|\tau_z|}{\theta_z} \right) \right] \quad (1)$$

式中 相关函数  $\rho(\tau_x, \tau_z)$  是关于模型中任意两点间水平距离  $\tau_x$  和竖向距离  $\tau_z$  的函数;  $\theta_x$  和  $\theta_z$  分别是两个方向上的波动距离。当  $\theta_x \neq \theta_z$  时,表示为各向异性的相关性结构;当  $\theta_x = \theta_z$  时,表示为各向同性的相关性结构。

考虑到协方差矩阵分解法<sup>[10]</sup>生成的随机场精度较高,且较容易生成各向异性随机场,因此本文采用该法离散随机场网格。在具体的实施过程中,首先利用 FLAC<sup>3D</sup> 建立边坡二维数值计算模型,然后利用协方差矩阵分解法构建相同尺寸的随机场模型;进一步地利用随机场网格和数值网格之间的就近原则,实现随机场网格到数值网格的一一映射,进而针对边坡风险分析这一问题开展数值计算。不断重复这一过程,即可实现多次的 Monte-Carlo 随机计算和分析。

## 2 考虑多种失效模式的边坡风险评估方法

边坡的失效风险评估包括失稳概率的估计和失稳后果的估计<sup>[11]</sup>。边坡的失稳概率受诸多不确定因素的影响,可以采用可靠度分析的方法进行计算,而失稳后果则要根据边坡的重要程度,环境影响评估等来计算。在实际工程中,边坡发生失稳破坏后,直观上可以认为边坡滑体的规模越大造成的后果就越严重。基于此,Huang等<sup>[7]</sup>提出采用边坡失稳后滑体体积量化描述边坡失稳风险的方法,建立了边坡失稳风险量化评估的表达式:

$$R = C \times P_f \quad (2)$$

式中,  $R$  表示边坡失稳风险,  $C$  为量化的边坡失稳后果,  $P_f$  为边坡失稳概率。

本文侧重于研究土体抗剪强度各向异性随机场对边坡失稳风险的影响,借鉴该思路,同样采用滑坡体积作为一种近似的边坡失稳后果量化评估指标。另一方面,考虑到上式只适合于单一模式的边坡风险评估,然后在考虑土性参数空间变异性的随机分析中,每次随机计算得到边坡失稳模式不尽相同,因此,Huang 等<sup>[7]</sup>又对上述公式做了进一步的改进:

$$R = \sum_{i=1}^{n_f} P_{fi} \times C_i, \quad (3)$$

式中,  $n_f$  为多次随机计算中边坡发生失稳破坏的次数,  $P_{fi}$  和  $C_i$  分别为相应的边坡失稳概率和失稳后果。

为了进一步利用该式来定量评估多种失效模式下的边坡风险, 需要确定每种边坡工况下的失稳概率和失稳后果。考虑到参数空间变异性, 边坡失稳概率在多次随机计算中的结果也不尽相同。在  $N$  次随机计算中出现  $k$  次边坡失稳破坏, 则边坡的失效概率  $P_f$  为

$$P_f = k/N. \quad (4)$$

在开展边坡风险分析前, 需要计算边坡滑体的体积。本文借鉴了 Hicks 等<sup>[12]</sup>的做法, 该方法是在边坡上方构造一个假想点 (如图 1), 由该假想点向着边坡方向发散多条射线, 在每条射线上选择最大剪应变增量最大的单元作为目标单元, 将所有的目标单元连接起来就构成了边坡滑面。位于边坡最危险滑面上方的土体可以视为失稳滑体, 统计滑面上方单元的个数, 取所有失稳单元面积之和 (位于滑面上的单元按照 1/2 单元面积计算) 即为边坡失稳滑体的体积。Cheng 等<sup>[8]</sup>也利用了这种方法来计算失稳滑体的体积。

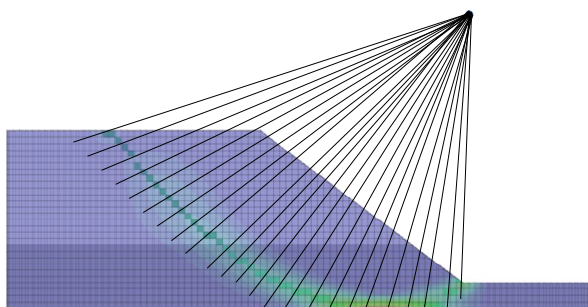


图 1 边坡滑体估算示意图

Fig. 1 Schematic of estimating volume of slope landslide

### 3 确定性分析

参照 Huang 等<sup>[7]</sup>的研究模型, 确定边坡的坡比为 0.75:1, 坡高为 24 m。利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件对该边坡展开稳定性分析, 土体均采用莫尔-库仑屈服准则, 本文考虑的是不排水情况下的工况, 其中上层土和下层土的不排水抗剪强度均值分别为 70 kPa 和 100 kPa, 变异系数均为 0.3, 都服从对数正态分布。两层土的重度均为 19 kN/m<sup>3</sup>。另外考虑到弹性模量和泊松比对边坡稳定的安全系数不大, 因此将其视为确定值, 在本研究中分别取为 100 MPa 和 0.3。本文采用强度折减法确定边坡的安全系数, 即利用边坡临界状态时强度参数的折减系数作为边坡的安全系数。

图 2 给出确定性条件下的边坡稳定性计算结果,

采用强度折减法计算得到该边坡安全系数为 1.247, 利用滑面搜索程序得到的滑体体积为 1009.25 m<sup>3</sup>/m。文献[13]中将双层边坡失效模式划分为浅层滑动和深层滑动, 本次确定性计算中表现为深层滑动。

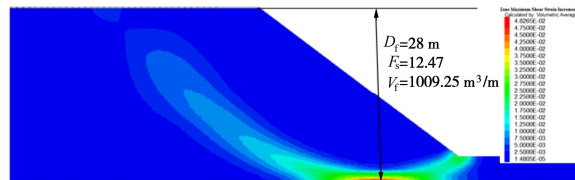


图 2 双层边坡的确定性计算结果图

Fig. 2 Deterministic calculated results of two-layer slope

### 4 随机性分析

在进行随机计算前, 有必要确定 Monte-Carlo 模拟次数。图 3 为边坡安全系数的均值随计算次数的变化关系。可知当随机次数为 1000 次时, 边坡安全系数均值已经基本趋于稳定, 因此本文采用 1000 次作为边坡随机计算的次数。

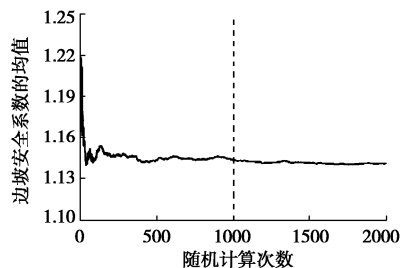


图 3 边坡安全系数均值与随机计算次数的关系

Fig. 3 Relationship between mean value of safety factor of slope and number of stochastic calculations

为了进一步研究土性参数各向异性随机场对边坡风险分析的影响, 需要设置不同的计算工况。为研究 COV、水平波动距离和竖向波动距离对边坡稳定性及风险评估的影响, 分别设置工况有 COV=0.1, 0.2, 0.3, 0.4 和 0.5 (对应  $\theta_x=30$  m,  $\theta_z=3$  m);  $\theta_x=3.75, 7.5, 15, 30, 60, 120$  m (对应  $\theta_z=3$  m, COV=0.3);  $\theta_z=2, 4, 8, 16, 32, 64$  m (对应  $\theta_x=80$  m, COV=0.3)。

图 4 (a) 给出了不同 COV 情况下的边坡失稳概率、失稳风险和失效模式的变化情况。可以看出, 随着 COV 的增大, 边坡失稳风险逐步增大, 其中 COV=0.1 和 COV=0.2 时, 几乎没有边坡失稳风险。整体而言, 边坡失稳概率和边坡失稳风险随变异系数的变化规律保持一致性。从边坡失效模式来看, 深层滑动模式占比很大, 但随着 COV 的增大, 深层滑动模式逐渐减少, 浅层滑动模式增多, 即深层滑动模式逐步向浅层滑动模式过渡。

图 4 (b) 给出了不同水平向波动距离情况下的边

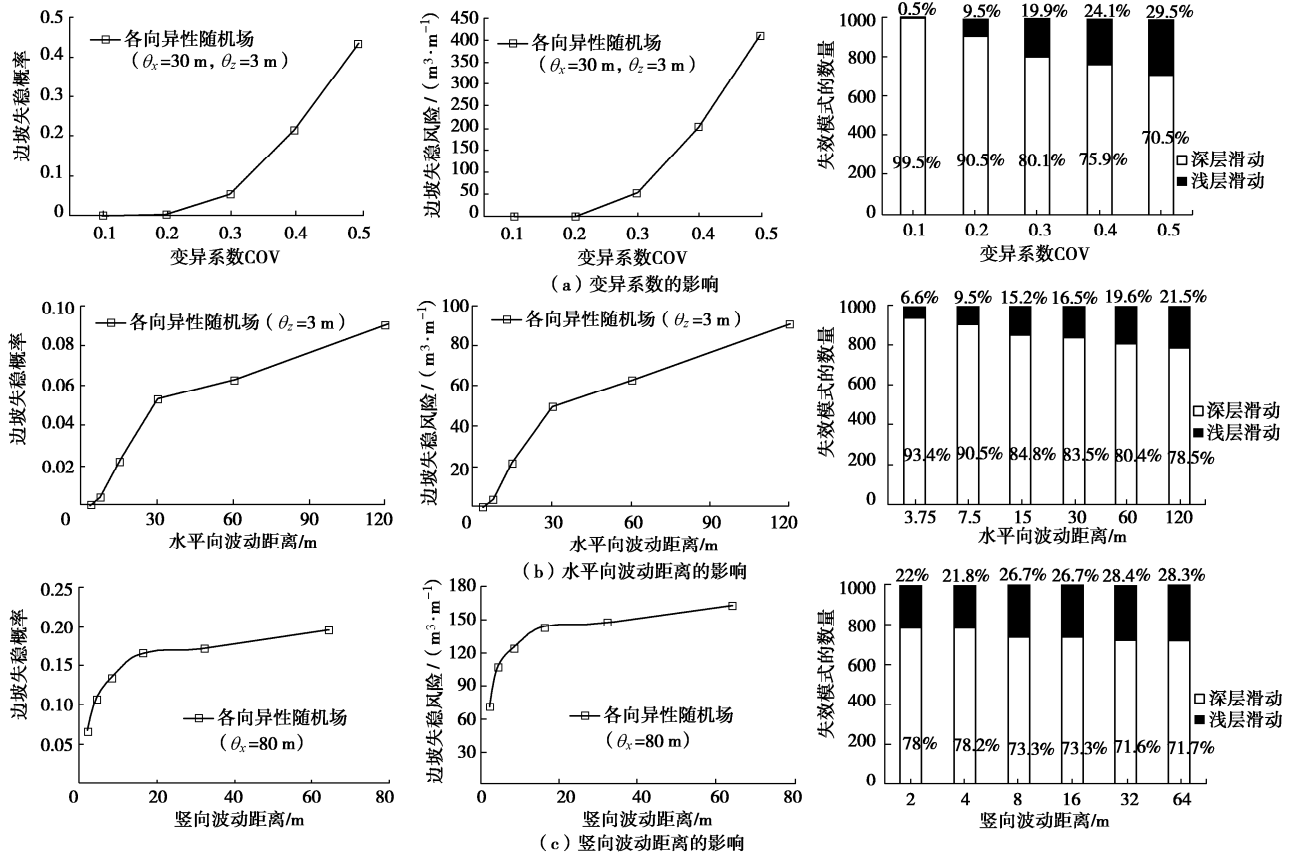


图 4 参数各向异性随机场对双层边坡失稳概率、失稳风险和失稳模式的影响

Fig. 4 Effects of anisotropy random field on probability of failure, risks of failure and instability modes for a two-layer slope

坡失稳概率、失稳风险和失效模式的变化情况。可以看出, 当水平向波动距离增大时, 边坡失稳概率和失稳风险均相应增大。注意到当  $\theta_x$  超过 30 m 时, 其增大趋势有所减缓, 此时  $\theta_x = 30$  m 刚好大致对应边坡的斜坡尺寸。当  $\theta_x < 30$  m 时, 增大对应波动距离时, 斜坡区域出现局部弱抗剪强度的可能性增大, 同时弱抗剪强度区域的范围也增大, 进一步加大了边坡失稳的风险; 当  $\theta_x > 30$  m 时, 增大其对应波动距离时, 斜坡出现局部弱强度的可能性虽然增大, 但此时整个边坡区域可能更加趋于“均质”, 即出现更大范围的弱强度区, 此时边坡失稳概率和失稳风险增长变缓。对于边坡失稳模式的分析, 可以看出当水平波动距离增大时, 深层滑动出现的可能性减小, 浅层滑动出现的可能性增大, 但总体而言, 深层滑动模式的占比都远大于浅层滑动模式。

图 4 (c) 给出了不同竖向波动距离情况下的边坡失稳概率、失稳风险和失效模式的变化情况。可以看出, 当竖向波动距离增大时, 边坡失稳概率和失稳风险均相应增大。相较于水平向波动距离, 失稳概率和失稳风险受竖向波动距离的变化更为敏感。其中, 当  $\theta_z > 16$  m 时, 边坡失稳概率和失稳风险增大趋势减缓; 当  $\theta_z < 16$  m 时, 边坡失稳概率和失稳风险随竖向波动

距离陡增。这与水平波动距离的影响类似, 此时的  $\theta_z = 16$  m 大约对应于边坡上层土的深度。对于边坡失稳模式, 可以看出, 双层边坡浅层滑动和深层滑动出现的概率受竖向波动距离的变化不大。由此得知, 相较于竖向波动距离, 双层边坡失效模式的变化受水平向波动距离的变化更为敏感。

## 5 结 论

本文针对某一双层黏土边坡, 考虑土体抗剪强度“横观各向同性”的空间变异性, 研究了土体参数的竖向波动距离、水平向波动距离和变异系数对边坡失稳概率、失稳模式和风险评估的影响。本文主要得到了以下结论:

(1) 随着 COV 的增大, 边坡失稳风险逐步增大, 在低变异性土体中, 几乎没有边坡失稳风险。整体而言, 边坡失稳概率和边坡失稳风险随变异系数的变化规律保持一致性。深层滑动模式占比很大, 但随着 COV 的增大, 深层滑动模式逐渐减少, 浅层滑动模式增多。

(2) 当波动距离 (包括水平向和竖向) 增大时, 边坡失稳概率和失稳风险均相应增大。尤其是当波动距离超过一定大小 (表现与边坡尺寸相关, 此案例中

水平波动距离与斜坡尺寸相一致, 竖向波动距离与上层土深度相一致) 时, 表现为失稳概率和失稳风险随着波动距离增大的幅度减缓。

#### 参考文献:

- [1] MORGENSTERN N R. Performance in geotechnical practice[J]. HKIE Transactions, 2000, 7(2): 2 - 15.
- [2] LUMB P. The variability of natural soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1966, 3(2): 74 - 97.
- [3] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of geotechnical variability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 612 - 624.
- [4] ALONSO E E. Risk analysis of slopes and its application to slopes in Canadian sensitive clays[J]. Géotechnique, 1976, 26(3): 453 - 472.
- [5] 程红战, 陈健, 王占盛, 等. 考虑旋转各向异性相关结构的黏土边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊2): 3965 - 3973. (CHENG Hong-zhan, CHEN Jian, WANG Zhan-sheng, et al. Stability analysis of a clay slope accounting for the rotated anisotropy correlation structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2): 3965 - 3973. (in Chinese))
- [6] GRIFFITHS D V, HUANG J S, FENTON G A. Influence of spatial variability on slope reliability using 2-D random fields[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(10): 1367 - 1378.
- [7] HUANG J, LYAMIN A V, GRIFFITHS D V, et al. Quantitative risk assessment of landslide by limit analysis and random fields[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 53: 60 - 67.
- [8] CHENG H Z, CHEN J, CHEN R P, et al. Risk assessment of slope failure considering the variability in soil properties[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 103: 61 - 72.
- [9] EL-RAMLY H, MORGENSTERN N R, CRUDEN D M. Probabilistic stability analysis of a tailings dyke on presheared clay shale[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(1): 192 - 208.
- [10] DAVIS M W. Production of conditional simulations via the LU triangular decomposition of the covariance matrix[J]. Mathematical Geology, 1987, 19(2): 91 - 98.
- [11] GUZZETTI F. Landslide hazard and risk assessment[D]. Bonn, Germany: Universitat Bonn, 2006.
- [12] HICKS M A, SAMY K. Influence of heterogeneity on undrained clay slope stability[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2002, 35(1): 41 - 49.
- [13] 李典庆, 肖特, 曹子君, 等. 基于高效随机有限元法的边坡风险评估[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1994 - 2003. (LI Dian-qing, XIAO Te, CAO Zi-jun, et al. Slope risk assessment using efficient random finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 1994 - 2003. (in Chinese))

(编校: 明经平)